

B A B IV

PERLENGKAPAN PEMBANGKIT

A. TURBIN AIR.

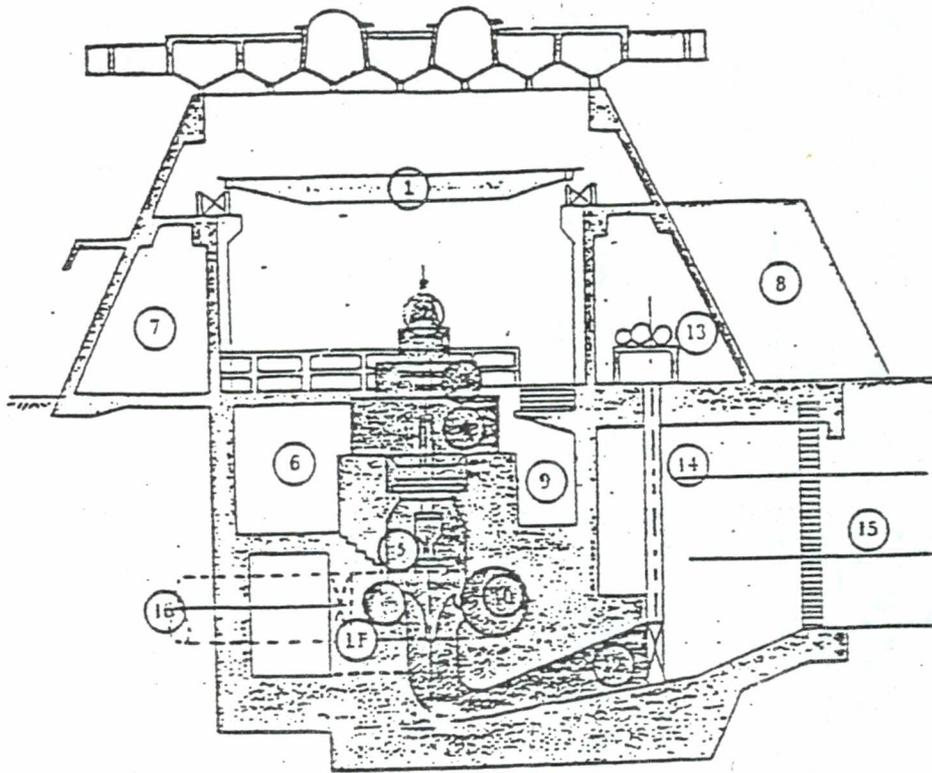
Turbin air adalah Turbin dengan air sebagai fluida kerja. Air mengalir dari tempat yang lebih tinggi menuju tempat yang lebih rendah. Dalam hal tersebut air memiliki energi potensial, proses aliran didalam pipa pesat energi potensial tersebut berangsur-angsur berubah menjadi energi kinetik.

Didalam energi kinetik air diubah menjadi energi mekanis, dimana air memutar Turbin, seperti halnya yang salah satunya dipergunakan di PLTA Selorejo.

Bagian Turbin yang berputar dinamakan Rotor atau roda Turbin sedangkan bagian yang tidak berputar dinamakan stator atau rumah turbin. Pada roda turbin terdapat sudu-sudu dan fluida kerjanya mengalir melalui ruang diantara sudu-sudu tersebut.

Apabila kemudian ternyata bahwa roda turbin terdapat putaran, maka tentu ada gaya yang bekerja pada sudu. Terjadinya gaya timbul karena terjadinya perubahan momentum dari fluida kerja yang mengalir diantara sudunya

Karena sudu tersebut bergerak bersama-sama dengan roda turbin, maka sudu tersebut dinamakan sudu gerak.



GAMBAR 10

POTONGAN PUSAT PEMBANGKIT LISTRIK

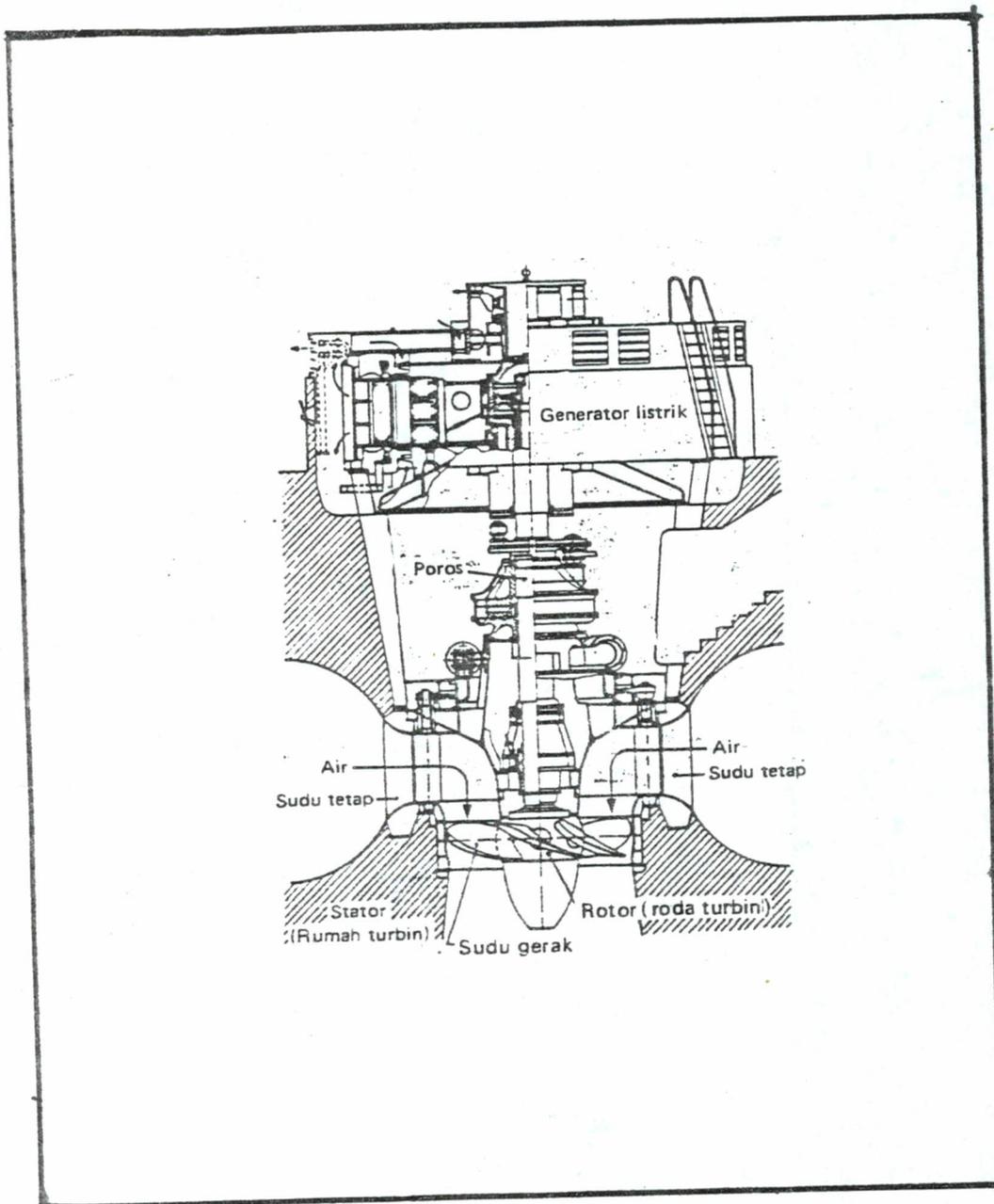
- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. Crane 15 dan 2 Ton | 7. Maintenance room/storage room |
| 2. Source Generator
2 KVA. AC. 110 V, 50 HZ | 8. Control room panel |
| 3. Exciter Generator
DC, 110 V, 45 KW | 9. Shaft Grease Pump |
| 4. Main Generator
5600 KVA 6600 V | 10. Spiral casing |
| 5. Turbin Pit 500 Rpm
(Jenis Kaplan) | 11. Butterfly valve |
| 6. Governor Control Unit | 12. Draft Tube |
| | 13. Motor Tail Race Gate |
| | 14. Tail Race Gate |
| | 15. Mendalan New Intake |
| | 16. Penstock. |

Pada sebuah roda turbin mungkin terdapat beberapa baris sudu gerak dan setiap barisnya disusun melingkari roda turbin, masing-masing dengan bentuk dan ukurannya sama, sudu yang tidak bergerak disebut sudu tetap, dimana sudu tetap mempunyai fungsi mengarahkan aliran fluida kerja masuk kedalam sudu gerak dan dapat berfungsi sebagai nozzle. Roda turbin harus ada dalam keadaan setimbang untuk mengurangi getaran dan mencegahnya terjadi kerusakan terutama akibat goresan antara sudu gerak dengan rumah turbin. Dengan persamaan ini, maka kapasitas tenaga yang dihasilkan turbin dapat dihitung antara lain :

- a. Jika jumlah air Q m³/detik jatuh dari ketinggian H meter, maka air tersebut dapat menghasilkan daya :

$$P = \gamma \times Q \times H \quad \text{Kgm/det.}$$

$$= 1000 \times Q \times H \quad \text{Kgm/det.}$$



GAMBAR 11
 JENIS TURBIN KAPLAN 16)

16) ARISMUNANDAR : Turbin.

b. Bila tenaga air dipakai memutar turbin air mempunyai rendemen, maka pada poros turbin keluar daya :¹⁷⁾

$$P_t (N) = \eta_T \times 1000 \times Q \times H \text{ Kgm/det.}$$

$$= \eta_T \times Y \times Q \times \frac{H}{550} \text{ HP}$$

$$= \eta_T \times 62,5 \times Q \times \frac{H}{550} \text{ HP}$$

Rendemen turbin bermacam-macam besarnya pada PLTA Selorejo mempunyai rendemen sebesar 0,9¹⁸⁾

Disamping kecepatan putaran nominal masih terdapat suatu kecepatan pada turbin yaitu yang dinamakan Kecepatan Spesifikasi, dimana kecepatan tersebut dapat menghasilkan 1 HP untuk setiap tinggi jatuh $H = 1 \text{ Ft.}$ Dalam bentuk persamaan kecepatan spesifikasi sebagai berikut :

$$n_s = \frac{n \sqrt{N}}{H^{5/4}} \text{ Rpm}$$

17) N. KOEI : Disign and Engineers hal. 3.

18) N. KOEI : Opcit

Dimana :

- n = Kecepatan turbin pada efisiensi maximum
(Rpm)
- N = Daya turbin (HP)
- H = Tinggi air jatuh (ft)

Maka untuk satu kondisi air tertentu (Q dan H tertentu), berdasarkan kecepatan spesifikasinya dapatlah ditentukan jenis turbin yang sebaiknya dipergunakan agar dapat diperoleh efisien yang maximum. Dapat dikatakan bahwa turbin dengan kecepatan spesifikasi yang lebih tinggi lebih ekonomis, kerana kecepatan yang lebih tinggi berarti unit turbinya lebih kompak.

Klasifikasi selanjutnya dari turbin air adalah sebagai berikut :
19)

1. Sesuai dengan tinggi air jatuh H :

Jenis turbin	Satuan (H, Ft)
- Turbin dengan tinggi air jatuh yang rendah	< 100 Ft
- Turbin dengan tinggi air jatuh yang sedang	100 - 1000 Ft
- Turbin dengan tinggi air jatuh yang tinggi	1000 ke atas

19) ARISMUNANDAR : Turbin hal 6 - 10

2. Sesuai dengan kecepatan spesifikasinya (n_s) H, Ft dan N (HP) :

Jenis turbin	Satuan N_s , Rpm		
- Turbin dengan spesifikasi rendah.	2	-	12
- Turbin dengan spesifikasi sedang	12	-	90
- Turbin dengan spesifikasi tinggi	90	-	250

Biasanya turbin dengan kecepatan spesifikasi yang rendah dipergunakan untuk H yang tinggi, sedangkan turbin dengan kecepatan spesifikasi yang tinggi dipergunakan untuk H yang rendah.

Turbin direncanakan untuk suatu kondisi air tertentu atau untuk Q dan H tertentu yaitu untuk memperoleh efisiensi yang maximum sesuai dengan kondisinya. Turbin dikatakan bekerja pada titik perencanaannya apabila turbin bekerja pada kondisi yang telah ditentukan namun demikian hal tersebut tidak selamanya dapat dipertahankan, mengingat kemungkinan terjadinya perubahan beban sehingga Q harus dirubah, jika dikehendaki putaran turbin yang konstan. Dalam menghitung kecepatan spesifikasi pada PLTA Selorejo, perlu diketahui antara : Kecepatan efisiensi maximum, daya turbin dan tinggi jatuh air

ke arah turbin sebagai media penggerak rotor guna dapat memutar poros yang dapat menghasilkan Tenaga Listrik :

Kecepatan maximum efektif pada PLTA Selorejo :

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

$$n = \frac{60 \cdot 50}{6}$$

$$n = 500 \text{ Rpm}$$

Sehingga dalam menentukan daya turbin dapat dihitung
20)

$$\begin{aligned} P_T \text{ (N)} &= \eta_T \times Q \frac{H \cdot Y}{550} \text{ HP} \\ &= 0,9 \times 51,6 \times \frac{138,3 \times 62,5}{550} \\ &= 730 \text{ HP.} \end{aligned}$$

20) Ibid hal 54.

Maka kecepatan spesifikasi dapat ditentukan dengan persamaan ini :

$$\begin{aligned}
 n_s &= \frac{n \sqrt{N}}{H^{5/4}} \\
 &= \frac{500 \sqrt{730}}{138,3^{5/4}} \\
 &= \frac{13509,25}{474} \\
 &= 29 \text{ Rpm.}
 \end{aligned}$$

Selain kecepatan nominal dan kecepatan spesifikasi, terdapat juga kecepatan turbin yang disebut kecepatan liar (Run away Speed). Ada kemungkinan bahwa pada waktu turbin bekerja, karena sesuatu dan lain hal, bebannya terpaksa dihentikan dengan tiba-tiba. Dalam hal ini tersebut ada gejala bahwa roda turbin akan berputar dengan sangat cepatnya yaitu apabila karena Governor tidak bekerja dengan baik atau dalam keadaan rusak. oleh karena itu kekuatan turbin harus diperhitungkan terhadap kecepatan yang liar untuk mencegah kerusakan turbin atau Generatornya.

Dengan adanya kecepatan liar akan dapat menimbulkan pengaruh kavitasi semakin tinggi. Karena sifatnya kavitasi itu sendiri adalah suatu peristiwa terjadinya gelembung-gelembung uap dalam cairan (air) yang mengalir apabila tekanan ditempat tersebut sama dengan uapnya. Gelembung-gelembung tersebut akan terbawa arus apabila gelembung tersebut kemudian sampai disuatu daerah dimana tekanannya melebihi tekanan uapnya, maka gelembung tersebut akan pecah dengan tiba-tiba. Pecahnya gelembung-gelembung tersebut buka saja menimbulkan bunyi berisik dan getaran tetapi dapat menyebabkan lubang-lubang kikisan pada permukaan dinding saluran ataau bagian turbin.

Kavitasi yang berlebihan dapat pula mengurangi daya dan efisiensi dari turbin. Kavitasi dapat dicegah atau dikurangi dengan jalan antara lain :

1. Memasang turbin pada tempat yang sebaik-baiknya yaitu memperkecil jarak vertikal (memperkecil tinggi isap). Dimana hal ini mengusahakan tekanan air tidak lebih rendah dari tekanan uapnya.
2. Memperbaiki konstruksi turbin dan mengusahakan agar tidak terdapat belokan-belokan atau bentuk tajam.

1. JENIS TURBIN DAN PENGGUNAANNYA : ²¹⁾

1.1. Turbin Reaksi :

Turbin jenis ini adalah turbin dimana ekspansi dari fluida kerja terjadi baik dalam sudu tetap maupun sudu gerak, sehingga rotor bekerja karena aliran air dengan tinggi terjun tekanan, yang termasuk jenis ini adalah antara lain :

- a. Turbin Francis : Turbin dimana air mengalir ke rotor dengan arah radial dan keluar dengan arah aksial, perubahan arah terjadi ketika lewat rotor.
- b. Turbin aliran diagonal : Turbin dimana air melewati rotor dengan arah diagonal menuju ke poros.
- c. Turbin Baling-baling : Turbin dimana melewati rotor dengan arah aksial. Turbin reaksi yang dapat dipakai sebagai pompa dengan membalik arah putaran rotor dinamakan Turbin pompa balik.

1.2. Turbin Impuls :

Turbin ini adalah turbin dimana proses ekspansi dari fluida kerjanya (proses penurunan tekanan), hanya terjadi didalam sudu-sudu tetapnya saja.

21)

Ibid hal 22

Jadi dalam hal ini diharapkan tidak terjadi penurunan tekanan didalam sudu gerak, tetapi dalam kenyataannya penurunan tekanan tak dapat dihindarkan karena adanya gesekan/goresan.

2. KONSTRUKSI TURBIN AIR :

2.1. Turbin Baling-baling :

Turbin jenis ini dipakai untuk tinggi terjun rendah, turbin baling-baling digolongkan menjadi dua menurut konstruksi bilahnya rotor :

- a. Turbin baling-baling dengan bilah rotor tetap.
- b. Turbin Kaplan dengan bilah sudu yang dapat digerakan otomatis. Sudu rotor pada turbin Kaplan mempunyai konstruksi yang dapat digerakan (menurut sumbunya) dan dapat berubah arah sudu bilahnya dengan secara manual atau otomatis sesuai dengan pembukaan sudu antarnya. Bilah rotor dibuka dan ditutup oleh tekanan minyak melalui katup pengontrol rotor dari alat pengatur kecepatan. Hubungan antara pembukaan sudu antar pada sudut bilah rotor biasanya dipertahankan oleh alat penghubung dari pengatur kecepatan agar turbin dapat bekerja dengan daya guna yang tinggi dan efisien.

c. Turbin Baling-baling yang dinamakan turbin tabung : yang biasa digunakan untuk terjun rendah sekali. Turbin ini mempunyai rumah (case) berupa silinder, sehingga aliran air mengalir melalui arah aksial pada selubung silinder Turbin jenis ini kebanyakan berjenis poros mendatar dan bagian peralatannya dipasang pada satu garis mulai dari tempat masuk turbin sampai tempat keluarnya pada pipa lepas (Draft tube). Katup tempat masuk, rotor dan Generatornya dirangkaikan langsung dengan turbin, pipa lepas dan lain sebagainya. Beberapa dari turbin jenis ini diperlengkapi dengan roda gigi percepatan (Speed Increasing Gear) yang terpasang antara kopling turbin air dan Generator.

2.2. Turbin Pelton :

Turbin Pelton dipakai untuk tinggi terjun (Head) yang tinggi. Sekarang jenis poros mendatar adalah yang paling sering banyak dipakai. Dahulu jenis poros tegaklah yang banyak dipakai. Rotornya dilengkapi dengan ember-ember yang dipasang sekeliling piringnya. Ember-ember tersebut menerima semprotan air mulut pancaran yang kemudian

mengembalikan pancaran air ini setelah membaginya kearah kiri dan kanan dengan bantuan sebuah punggung yang terdapat ditengah ember. Ember ini mengalihkan tenaga impuls yang didapatnya pada piringan. Ada dua macam ember yaitu yang terpasang pada piringan dengan baut dan yang cor menjadi satu dengan piringnya.

Sebuah jarum dipasang dipusat mulut-mulut pancaran untuk mengatur jumlah aliran air, yaitu dengan menggerakkan maju dan mundur serta untuk mengisi lubang keluar dari mulut pancaran, ini digerakkan oleh pengatur kecepatan sesuai dengan perubahan beban.

Deflector adalah alat untuk membelokan pancaran air dan dipasang antara mulut pancaran dan rotor. Bila beban tiba-tiba dibuang, deflector secara darurat menghalang-halangi pancaran air. Kemudian tempat keluar mulut pancaran dengan perlahan-lahan disumbat oleh jarumnya. Kenaikan kecepatan turbin dan kenaikan tekanan pada pipa pesat dikendalikan oleh sebuah katup kecil.

2.3. Turbin Francis :

Turbin Francis dipakai untuk berbagai keperluan dengan tinggi terjunan menengah. Rumah siput dibuat dari plat baja, baja cor atau besi cor, sesuai dengan tinggi terjunan dan kapasitasnya serta berfungsinya menahan bagian terbesar dari beban hidrolis yang diterima oleh turbin. Tekanan selebihnya ditahan oleh sudu kukuh atau cincin kukuh. Sudu-sudu antar diatur disekeliling luar rotor dan mengatur daya keluar turbin, dengan mengubah-ubah bukaannya sesuai perubahan beban melalui suatu mekanisme pengatur bentuk rotor berbeda-beda, maka pemakaiannya disesuaikan dengan jenis kecepatannya.

2.4. Turbin Aliran Diagonal :

Turbin air ini digunakan untuk tinggi terjun yang tinggi dari turbin baling-baling sampai batas tinggi terjun menengah dari turbin Francis. Biasanya jenis ini mempunyai turbin sudu rotor yang dapat digerakan seperti turbin baling-baling turbin. Turbin aliran diagonal yang dilengkapi dengan pengatur bilah sudu secara otomatis dan hidrolis disebut juga turbin Deriaz. Konstruksinya sangat mirip dengan turbin baling-baling

Dari beberapa jenis turbin air yang ada pada umumnya, PLTA Selorejo memakai Turbin Kaplan. Pemakaian ini dilihat dari pengamatan kondisi waduk dan letak bangunan PLTA ditempatkan menurut geografisnya yang telah ditentukan.

B. PENURUNAN DAYA PADA PIPA PESAT :

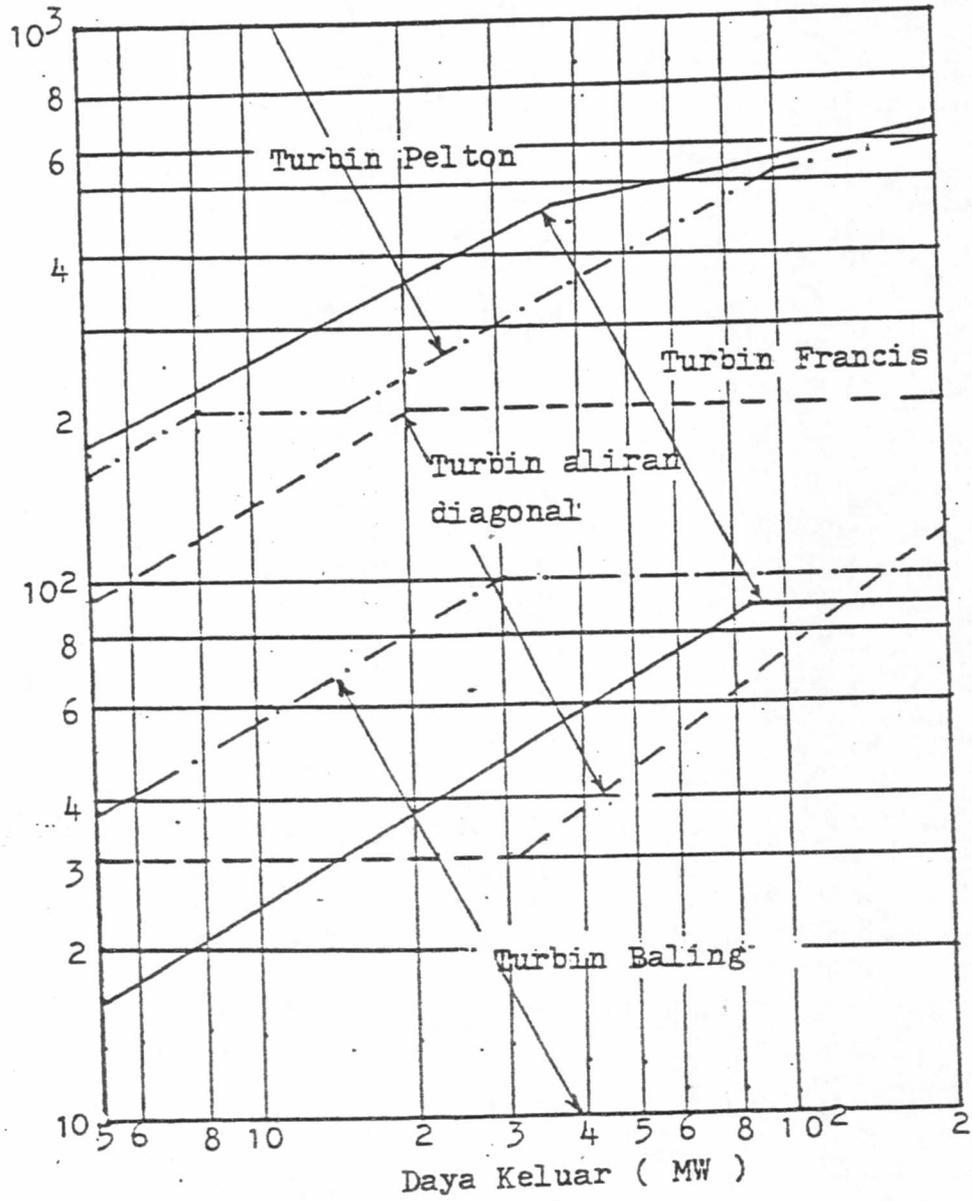
Untuk mengitung penurunan daya yang terjadi pada pipa pesat terlebih dahulu harus diketahui besarnya penurunan tekanan yang terjadi pada pipa pesat.

Penurunan tekanan ini merupakan kerugian tekanan akibat adanya gesekan-gesekan partikel air dengan bagian dalam dinding dari pipa pesat. Oleh sebab itu pipa pesat tidak selamanya merupakan pipa yang lurus terus menerus, maka terdapat dua macam kerugian gesekan yang timbul yaitu :

1. Kerugian gesek air pada gesekan pipa pesat yang kondisi menyudut (berupa belokan).
2. Kerugian gesek air pada saluran pipa pesat yang kondisinya lurus.

Akibat dari pengaruh adanya gesekan dari air yang ditimbulkan oleh pipa pesat, dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta P = \Delta_{p1} + \Delta_{p2} \dots\dots\dots (1)$$



GAMBAR 12
 GRAFIK MENENTUKAN TURBIN ²²⁾

²²⁾ Ibid hal 54

Dimana :

Δ_{p1} = Jumlah rugi-rugi gesek pada saluran lurus

Δ_{p2} = Jumlah rugi-rugi pada saluran yang membelok

Pada rugi-rugi gesekan untuk selanjutnya dapat dirumuskan seperti persamaan sebagai berikut :

$$\Delta_{p1} = \sum f \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g} \cdot \rho \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

f = Faktor gesekan

d = Diameter dalam dari pipa pesat

v = Kecepatan rata-rata air dalam pipa pesat

g = Percepatan gravitasi

ρ = Rapat massa

l = Panjang saluran.

$$\Delta_{p2} = \sum k \frac{v^2}{2g} \times \rho \dots \dots \dots (3)$$

Dimana :

- k = Koefisien tekanan pada saluran membelok.
 V = Kecepatan rata-rata air dalam pipa pesat
 g = Percepatan gravitasi
 ρ = Rapat massa

1. FAKTOR GESEKAN (λ) :

Untuk mencari harga suatu faktor gesekan disini dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :
 23)

(Formula Langs) :

$$f = \lambda + 16 \sqrt{\frac{\lambda \cdot \nu}{Vd}} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana :

- f = Faktor gesekan
 λ = Koefisien gesekan
 V = Kecepatan rata-rata dalam pipa pesat
 d = Diameter dalam pipa pesat
 ν = Kekentalan Kinematika.

Untuk dapat menyesuaikan besarnya rugi gesekan maka dapat dilihat data dari kekentalan kinematika (ν)
 24)
 dan koefisien gesekan (λ)

23) Ibid hal 22

24) Ibid hal 22

TABEL 5
DATA KOEFISIEN GESEK (α)

Jenis pipa saluran	Koefisien (α)
Tembaga yang masih baru	0,011 - 0,012
Baja atau besi cor yang baru	0,013 - 0,014
Tembaga lama	0,023
Besi cor lama	0,023 - 0,030

TABEL 6
DATA KEKENTALAN KINEMATIKA (ν)

Suhu air $^{\circ}$ C	Kekentalan (ν)
0	$0,01775 \times 10^{-4}$
10	$0,01320 \times 10^{-4}$
20	$0,01010 \times 10^{-4}$
30	$0,00805 \times 10^{-4}$
40	$0,00695 \times 10^{-4}$
60	$0,00467 \times 10^{-4}$
80	$0,00351 \times 10^{-4}$
100	$0,00274 \times 10^{-4}$

2. KECEPATAN RATA-RATA AIR DALAM PIPA PESAT

Untuk memperoleh debit aliran dengan menganalisa lusan penampang yang dialiri dengan kecepatan air yang mengalir, maka dapat dituliskan persamaan secara garis besarnya sebagai berikut :²⁵⁾

$$Q = A \cdot V \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot V$$

$$V = \frac{4}{\pi} \times \frac{Q}{d^2}$$

Dimana :

- V = Kecepatan rata-rata aliran dalam pipa pesat
- Q = Debit air
- A = Luas penampang pipa pesat
- d = Diameter dalam dari pipa pesat

²⁵⁾ M.E.S JAPAN : Piping System hal 10.

3. KOEFISIEN TAHANAN PADA PIPA PESAT :

Dalam menentukan harga satuan pada tahanan yang ditimbulkan oleh adanya belokan pipa pesat dalam mengantarkan medianya pada turbin yang terdapat tiga saluran yang mempunyai nilai tahanan :²⁶⁾

- Koefisien 0,02 (k1) = 2,5 m
- Koefisien 0,03 (k2) = 2,2 m
- Koefisien 0,05 (k3) = 1,8 m

4. RAPAT MASSA :

Pendangkalan pada waduk itu pada umumnya terjadi berasal dari uraian-uraian batu-batuan serta pecahan-pecahannya, maka disimpulkan beberapa bentuk perubahannya :

- Pasir = Kuarts
- Lanau = Silica
- Kerikil = Pecahan dari batu
- Tanah liat = Pecahan dari mika

Pada pendangkalan pada umumnya mempunyai kerapatan massa partikel dalam bermacam-macam, dimana secara sempit mempunyai batasan-batasan. Akibat pendangkalan didalam waduk masih sebagian besar disebabkan oleh kuarts, maka rapat massa diperkirakan rata-rata 2650 Kg/m³.

26) Ibid hal 22.

Dengan telah dilakukannya perhitungan penurunan tekanan, maka perhitungan penurunan daya dapat dilakukan dengan mengalikan debit air dengan penurunan tekanan yang melalui saluran pipa pesat dan prosentase volume kandungan pendangkalannya yang telah bercampur menjadi satu dengan air yang melalui pipa pesat, sehingga dapat dirumuskan pada persamaan ini :

$$P = \frac{\Delta_p \times Q \times P_p}{100} \dots\dots(6)$$

Dimana :

P = Penurunan daya

Δ_p = Penurunan tekanan

Q = Debit air

P_p = Prosentase pendangkalan air yang

$$\text{Untuk } P_p = \frac{\text{Volume pendangkalan didalam air}}{\text{Volume air seluruhnya}} \times 100$$

Dengan persamaan diatas, maka masukan daya turbin dapat dihitung dengan memakai persamaan rumus ini :

$$\begin{aligned} P'_t &= P_t - P \\ &= 9,8 \cdot Q \cdot H - P \end{aligned}$$

Dengan penggunaan persamaan diatas, maka perhitungan penurunan daya pada pipa dapat dilakukan untuk rata-rata kecepatan aliran air dalam pipa pesat terlebih dahulu debit air rata-rata pada keadaan nominal.

Kondisi nominal yang terdapat pada PLTA Selorejo yaitu :

1. Ketinggian efektif maximum = 41,5 m
2. Ketinggian air dari permukaan air laut = 622 m
3. Output Generator = 5600 KVA
4. Efisiensi Generator = 0,98
5. Efisiensi Turbin = 0,9

Dengan data-data diatas kita dapat menghitung dengan persamaan ini :

$$P_o = 9,8 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot Q \cdot H \dots\dots(7)$$

$$Q = \frac{P_o}{9,8 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot H}$$

$$= \frac{5600}{9,8 \cdot 0,9 \cdot 0,98 \cdot 41,5}$$

$$= 15,5 \text{ m}^3/\text{det}$$

Apabila dalam saluran pipa pesat mempunyai diameter rata-rata :

$$\begin{aligned} d &= \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \\ &= \frac{2,5 + 2,2 + 1,8}{3} \\ &= 2,16 \text{ m} \end{aligned}$$

Maka dengan memasukan persamaan (7) dapat dihitung kecepatan rata-rata :

$$\begin{aligned} V &= \frac{4}{\pi} \times \frac{Q}{d^2} \\ &= \frac{4}{\pi} \times \frac{15,5}{(2,16)^2} \\ &= \frac{62}{14,65} = 4,2 \text{ m}^3/\text{det.} \end{aligned}$$

Dalam menentukan besaran harga gesekan yang timbul, harus terlebih dahulu diketahui harga besaran koefisien gesek (λ) dan kekentalan Kinematika (ν).

Pada keadaan pertama koefisien gesekan (α) ditentukan 0,015 dalam kondisi yang lama koefisien gesekan (α) sebesar 0,025, dimana disini suhu dianggap 3 °C. Harga Kinematika (ν) pada suhu 20 °C sebesar : $0,01010 \times 10^{-4}$, sedangkan untuk 0 °C sebesar : $0,01775 \times 10^{-4}$. Jadi besarnya harga kekentalan Kinematika air :

$$= (0,01010 + \frac{20 - 3}{20 - 0} \times 0,01775) \times 10^{-4}$$

$$= 0,16 \times 10^{-4}$$

Sehingga dengan memakai Formula Langs, maka dapat ditentukan besarnya faktor gesekan (f) sebagai berikut

$$f_{\text{baru}} = \alpha + 16 \sqrt{\frac{\alpha \nu}{Vd}}$$

$$= 0,013 + 16 \sqrt{\frac{0,013 \times 0,16 \times 10^{-4}}{4 \cdot 2,16}}$$

$$= 0,013 + 0,0025$$

$$= 0,0155$$

$$\begin{aligned}
 f_{\text{lama}} &= \alpha + 16 \sqrt{\frac{\alpha \sigma}{Vd}} \\
 &= 0,025 + 16 \sqrt{\frac{0,025 \cdot 0,16 \cdot 10^{-4}}{8,8}} \\
 &= 0,025 + 0,0034 \\
 &= 0,0284
 \end{aligned}$$

Karena adanya faktor gesekan dan tahanan, maka tekanan yang ditimbulkan oleh air melalui saluran pipa pesat mengalami kekurangann tekanan, dalam menentukan penurunan tekanan dapat mempergunakan persamaan :

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= \Delta_{p1} + \Delta_{p2} \\
 &= \sum f \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} e + \sum k \frac{V^2}{2g} e \quad \dots(8)
 \end{aligned}$$

Maka awal pengoperasiannya besarnya harga dari koefisien (f) = 0,0155, sehingga akan didapatkan harga penurunan tekanan :

$$\begin{aligned}
 \Delta_{p1} &= 0,0155 \left(\frac{15}{2,5} + \frac{40}{2,2} + \frac{8}{1,8} \right) \frac{4,2^2}{2,9,8} \times \\
 &\quad 6250 + (0,02 + 0,03 + 0,05) \frac{4,2^2}{2,9,8} \times \\
 &\quad 6250 \\
 &= 0,0155 \cdot 28,62 \cdot 0,9 \cdot 6250 + 0,1 \cdot 28,63 \\
 &\quad \cdot 6250. \\
 &= 2495,31 + 17887,5 \\
 &= 20382,81 \text{ Kg/m}^2
 \end{aligned}$$

Pengoperasian sudah berjalan beberapa lama (tahun) maka harga besaran penurunan tekanan ikut terpengaruh terhadap faktor gesekan (f) sebesar : 0,0264 dengan demikian penurunan tekananpun ikut juga berubah menjadi :

$$\begin{aligned}
 \Delta_{p2} &= 0,0284 \cdot 28,62 \cdot 0,9 \cdot 6250 + 0,1 \cdot 28,63 \\
 &\quad \cdot 6250. \\
 &= 4572,05 + 17887,5 \\
 &= 22459,55 \text{ Kg/m}^2
 \end{aligned}$$

Dengan selesainya perhitungan penurunan tekanan yang terjadi pada sistem saluran, maka untuk menghitung penurunan dayanya (Δ_p) sebagai berikut :

- a. Pada kondisi prosentase pendangkalan tahun pertama pengoperasian waduk sebesar = 0,048 %

$$\begin{aligned} \Delta_{p1} &= \frac{\Delta_{p1} \cdot Q \cdot P_0}{100} \\ &= \frac{20382,81 \cdot 15,5 \cdot 0,048}{100} \\ &= \frac{15164,81}{100} \\ &= 151,65 \quad \text{Kg/det.} \end{aligned}$$

- b. Pada kondisi prosentase pendangkalan tahun 1995 sebesar = 2,25 %

$$\begin{aligned} \Delta_{p2} &= \frac{\Delta_{p2} \cdot Q \cdot P_0}{100} \\ &= \frac{22459,55 \cdot 15,5 \cdot 2,25}{100} \end{aligned}$$

Apabila dari hasil diatas kita nyaatakan dalam KW
maka hasilnya sebagai berikut :

$$\Delta_{p1} = \frac{151,65}{75} \times 0,736$$

$$= 1,49 \text{ KW}$$

$$\Delta_{p2} = \frac{7832,76}{75} \times 0,736$$

$$= 76,86 \text{ KW}$$

TABEL 7 27)

DATA TURBIN AIR PADA PLTA SELOREJO

D A T A	UKURAN (meter)	OUT PUT (Kw)
Efektif Head maximum	41,5	4800
Efektif normal	37,3	4800
Efektif minimum	18,3	2000

Dimana putaran nominal 500 Rpm, putaran liar 1500 Rpm dengan jenis turbin Kaplan.

27)

Ibid hal 22.

C. G E N E R A T O R :

Suatu alat yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik melalui media perantara tertentu baik berupa turbin (Air, Uap dan Gas) maupun motor bakar dan lain sebagainya.

Untuk Pembangkitan energi tenaga listrik dengan kapasitas yang besar pada umumnya menggunakan Generator tiga fasa, karena daya yang dihasilkan Generator jenis ini tiga kali dari pada Generator sataau fasa. Untuk menghitung daya Generator tiga fasa dapat dipergunakan persamaan matematis sebagai berikut :

$$P_g = I_L \cdot E_L \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{3} \dots\dots (9)$$

Dimana :

P_g = Daya yang dihasilkan Generator (KW)

E_L = Tegangan line (KV)

I_L = Arus line (A)

$\cos \theta$ = Power Faktor

Berdasarkan persamaan (9) maka daya yang dikeluarkan dapat dihitung :

$$\begin{aligned}
 P &= 490 \cdot 6,6 \cdot 0,8 \cdot 1,73 \\
 &= 4475,86 \text{ KW} \\
 &= 4,475 \text{ MW} = 4,5 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Dengan memandang arah porosnya Generator turbin air dibedakan beberapa golongan :

a. Poros Vertikal :

Pada PLTA Selorejo menggunakan poros ini karena sangat sesuai untuk mesin-mesin berdaya cukup besar dengan putaran rendah. Penggunaannya sangat menguntungkan dipandang dari kebutuhan ruangan yang tidak terlalu luas.

b. Poros Horizontal :

Dipergunakan untuk mesin-mesin putaran tinggi dan berdaya relatif kecil.

Kecepatan putar nominal Generator direncanakan untuk melawan maximum Run away speed apabila tanpa beban dapat ditentukan oleh beberapa faktor, hal ini dapat dilihat

pada persamaan dibawah ini :

$$n = \frac{60 \cdot f}{P}$$

Dimana :

- n = putaran permenit (Rpm)
 f = frekwensi (HZ)
 P = jumlah pasang kutub
 60 = dari menit dijadikan detik

c. Efisiensi Generator :

Efisiensi Generator yang berhubungan dengan turbin dapat diketahui dengan persamaan 28) :

$$\text{EFISIENSI RATA-RATA} = \frac{25A + 50B + 20C - 5D}{100}$$

Dimana : A, B, C dan D adalah efisiensi jaminan toleransi minimum pada bahan. Semua kerugian yang ada pada Generator meliputi reostat, Exciter dan kerugian lain-lain yang bisa diabaikan dalam perhitungan efisiensi termasuk kerugian Thrust Guide dan Bearing. Besar nilai jaminan toleransi bahan :

28) MAIDENSHA : Consultan and Engineers.

Power faktor 0,8 Lag : A = 100 % = 95,1
B = 80 % = 94,1
C = 60 % = 94,2
D = 40 % = 92,6
dari Rated Output.

Power faktor 1,0 : A = 100 % = 96,4
B = 80 % = 96,4
C = 60 % = 95,6
D = 40 % = 94,3
dari Rated Output.

d. Pengaturan Tegangan :

Cara bekerjanya dengan tegangan konstan merupakan metoda yang umum dipakai untuk memperoleh tegangan hampoir konstan pada terminal Generator, dengan mempergunakan pengatur tegangan AVR.

Jika beban atau komposisi sistem berubah secara dratis maka untuk menjaga agar tegangan konstan, excitasi Generator berubah besarnya, sehingga menimbulkan excitasi lebih atau excitasi kurang.

Untuk operasi dengan faktor daya konstan arus medan diatur, sehingga perbandingan antara daya reaktif (KVAR) dan daya nyata (KW)

menetap pada suatu harga tertentu tanpa pengaruh oleh besarnya beban Karena definisi pengaturan tegangan merupakan perubahan tegangan nol ke tegangan beban penuh dengan menjaga excitasi tetap dan putaran juga tetap. Dalam menentukan pengaturan tegangan pada sistem secara langsung dapat dilakukann dengan mengukur para meter yang telah ada pada sistem skala penunjukannya.

e. Hubungan Generator :

Hubungan Generator dengan sistem star yang dilakukan pada belitan statorntya dengan tiga ujung keluar dan hubungan line side, sedang tiga ujung lainnya (sisi netral) diketanahkan untuk perlindungannya melalui netral grounding.

Pengetanahan sistem ini dilakukan dengan melalui belitan tegangan tinggi pada trafo dengan menyisipkan tahanan pada sisi tegangan rendah untuk membatasi arus pengetanahan sebesar 5 sampai dengan 15 Ampere. Untuk menghitung besarnya nilai tahanan (R) dapat mempergunakan persamaan dibawah ini :

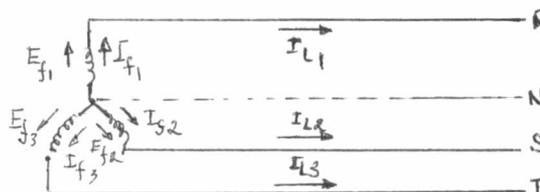
$$R = \frac{6}{10} \frac{10^6}{6 \pi f C N^2}$$

Dimana :

C = Kapasitansi tiap fasa dari rangkaian urutan nol dari Generator (F)

f = F r e k w e n s i (HZ)

N = Perbandingan lilitan dari trafo.



GAMBAR 7

HUBUNGAN GENERATOR TIGA FASA

$$I_L = I_f$$

$$E_f = \frac{E_L}{1,73}$$

Keuntungan dari sistem hubungan star dibandingkan dengan hubungan Delta antara lain :

29) Ibid hal 81.

- a. Titik bintang (netral) dapat diketanahkan sehingga potensial hantaran ditetapkan terhadap tanah.
- b. Dapat bekerja dalam keadaan darurat misal salah satu line fasanya terjadi gangguan
- c. Kapasitansi kecil, akan didapatkan dua tegangan yang berbeda untuk penerangan dan tenaga.

C. PENURUNAN DAYA PADA GENERATOR AKIBAT PENDANGKALAN :

Masukan daya turbin untuk pembangkit listrik tenaga air :³⁰⁾

$$P_t = 9,8 \cdot Q \cdot H$$

Dimana :

P_t = Masukan daya turbin (KW)

Q = Debit air (m³/det)

H = Tinggi jatuh air (m)

Untuk masukan daya Generator dirumuskan sebagai berikut :

$$P_g = 9,8 \cdot \eta_t \cdot Q \cdot H$$

³⁰⁾

Ibid hal 22.

Dimana :

P_g = Masukan daya Generator

η_t = Efisiensi turbin

Sehingga daya yang dikeluarkan oleh turbin dan generator dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{out} = 9,8 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot Q \cdot H$$

Dari perhitungan yang telah selesai diasumsikan dengan efisiensi Turbin (η_t) dan efisiensi Generator (η_g),³¹⁾ dimana besarnya masing-masing efisiensi tersebut :

- Efisiensi Turbin = 0,9
- Efisiensi Generator = 0,98

Maka bila dengan memasukan persamaan sebelumnya sehingga dapat dihitung besarnya penurunan daya keliuar Generator pada tahun-tahun pertama pengoperasian waduk³²⁾ sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_{out 1} &= \eta_t \cdot \eta_g \cdot \Delta_{p1} \text{ (KW)} \\ &= 0,9 \cdot 0,98 \cdot 1,49 \\ &= 1,31 \text{ KW.} \end{aligned}$$

31) Ibid hal 81

32) Ibid hal 22

Sedangkan penurunan daya keluar Generator tahun 1995 :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out } 2} &= \eta_t \cdot \eta_g \cdot \Delta_{P_2} \quad (\text{KW}) \\
 &= 0,9 \cdot 0,98 \cdot 76,86 \\
 &= 67,79 \quad \text{KW}
 \end{aligned}$$

Apabila faktor beban tahunan dari Pembangkit listrik tenaga air Selorejo sebesar 0,87, maka penurunan kapasitasnya daya keluar dalam satu tahun dari mulai pengoperasian waduk adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= 1,31 \cdot 0,87 \cdot 24 \cdot 365 \\
 &= 9983,77 \quad \text{KWH} \\
 &= 9,98 \quad \text{GWH}
 \end{aligned}$$

Pada tahun 1995 apabila masih beroperasi, maka penurunan daya keluar hasilnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= 67,79 \cdot 0,87 \cdot 24 \cdot 365 \\
 &= 516641,15 \quad \text{KWH} \\
 &= 516,64 \quad \text{GWH}
 \end{aligned}$$

Daya keluar tahunan pada PLTA Selorejo adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= 4800 \cdot 0,87 \cdot 24 \cdot 365 \\
 &= 36581760 \quad \text{KWH} \\
 &= 36581,76 \quad \text{GWH}
 \end{aligned}$$

Prosentase penurunan daya keluar Generator pada tahun pertama dari pengoperasian waduk :

$$\begin{aligned}
 &= \frac{9,98}{36581,76} \times 100 \% \\
 &= 0,03 \%
 \end{aligned}$$

Prosentase penurunan daya keluar Generator pada tahun 1995 :

$$\begin{aligned}
 &= \frac{516,64}{36581,76} \times 100 \% \\
 &= 0,14 \%
 \end{aligned}$$

TABEL 9
PENGARUH PENDANGKALAN WADUK TERHADAP DAYA KELUAR
GENERATOR

T_o	V_T (m ³)	ΔP (Kg/m ²)	Δp (Kg/det)	ΔP_{out} (Kw)
1	$0,27 \times 10^6$	20383	152	1,3
5	$1,36 \times 10^6$	20690	1437	12,3
10	$2,72 \times 10^6$	21459	2820	24,43
15	$4,08 \times 10^6$	22613	4374	37,85
20	$5,44 \times 10^6$	24151	6169	53,36
25	$6,80 \times 10^6$	26073	6277	71,61
30	$8,16 \times 10^6$	28380	10769	92,21

T_o = Selang pengoperasian waduk (tahun)

V_T = Volume pendangkalan waduk (m³)

ΔP = Penurunan tekanan pada pipa pesat (Kg/m²)

Δp = Penurunan tekanan pada turbin (Kg/det)

ΔP_{out} = Penurunan daya keluar Generator (KW)